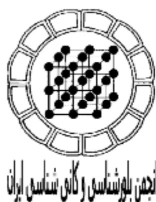
مجله
بلورشناسی
و کانی شناسی
ایران

سال بیست و چهارم، شمارهٔ اول، بهار ۹۵، از صفحهٔ ۱۶۷ تا ۱۸۰



بررسی کانی‌شناسی آزبست در مجموعه دگرگونی تخت سلیمان در شمال شرق تکاب- NW ایران

رباب حاجی علی اوغلی*، محسن مؤذن

گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

(دریافت مقاله: ۹۴/۱/۱۷، نسخه نهایی: ۹۴/۴/۶)

چکیده: سنگ‌های الترامافیک در مجموعه‌ی دگرگونی پرکامبرین تخت سلیمان بر اساس درجه‌ی سرپانتینی شدن در دو دسته متاپریدوتیت‌های سرپانتینی شده و سرپانتینیت‌ها رده‌دسته‌بندی شده‌اند. سرپانتین با بیش از ۹۰٪ حجمی، تشکیل دهنده‌ی اصلی سرپانتینیت‌هاست. انواع سرپانتینیت‌ها بر اساس نوع پلی‌مورف‌های سرپانتین، ویژگی‌های ریزساختاری و بافتی شامل سرپانتینیت‌های توده‌ای، سرپانتینیت‌های شیستی و سرپانتینیت‌های کریزوتیل‌دار شناسایی شدند. کریزوتیل در سرپانتینیت‌ها طی شرایط ایستایی و برشی شکننده تشکیل شده است. در شرایط ایستایی کریزوتیل به همراه لیزاردیت حاصل از تجزیه‌ی الیوین و پیروکسن در بافت‌های سودومورفی غربالی و بستایت در سرپانتینیت‌های توده‌ای تشکیل شده است. با تشکیل و گسترش یک سری درز و شکاف در شرایط برشی شکننده در راستای منطقه‌های برشی محلی، پدیده‌ی سرپانتینی شدن دوباره فعال شده و الیاف کریزوتیل با گستردگی بالا در زمینه‌ی ریز دانه‌ی سنگ و نیز به‌صورت پر کننده‌ی رگچه‌هایی به ضخامت میلی‌متری در شکستگی‌های داخل سرپانتینیت تبلور یافته است. ضخامت نازک رگچه‌های آزبست در سرپانتینیت‌های کریزوتیل دار تخت سلیمان احتمالاً در ارتباط با مقادیر بالای الیوین در ترکیب پروتولیت سرپانتینیت‌هاست. مقادیر کم Cr_2O_3 در ترکیب شیمی کریزوتیل‌های آنالیز شده، مقادیر کم کلینوپیروکسن و فراوانی الیوین در پروتولیت، سرپانتینیت‌ها را تایید می‌کند. سرپانتینیت شیست‌ها در شرایط برشی شکل‌پذیر در منطقه‌های برشی ناحیه‌ای تشکیل شده‌اند. رگه‌های آزبست آمفیبولی به ضخامت چندین متر به‌صورت پر کننده‌ی درزها و شکستگی‌ها در منطقه‌های برشی ناحیه‌ای تشکیل شده‌اند. طول الیاف ظریف و بلند آزبست آمفیبول تا چند سانتی‌متر نیز می‌رسد. بر اساس ویژگی‌های ریخت-شناسی، سنگ نگاری، داده‌های بیناب سنجی رامان، کانی‌شناسی XRD و بررسی ریزپردازشی، آزبست در سرپانتینیت‌های تخت سلیمان از نوع آزبست کریزوتیل و آزبست ترمولیت تشخیص داده شد

واژه‌های کلیدی: *آزبست؛ بیناب سنجی رامان؛ XRD؛ شیمی کانی؛ تخت سلیمان؛ شمال غرب ایران.*

مقدمه

آزبست به گروهی از ترکیبات طبیعی با فرمول سیلیکات هیدراتی منیزیم با ساختار فنری یا میله‌ای و با شکل فیبری و الیافی با نسبت طول به عرض بیشتر از ۲۰:۱ اطلاق می‌شود [۱]. الیاف آزبست با نسبت بالای طولی به ضخامت، خواص مکانیکی شبیه الیاف آلی را از خود نشان داده و دارای قدرت کششی بالا و مقاومت زیاد در مقابل گرماست.

آزبست از دیدگاه کانی‌شناسی شامل دو گروه (الف) آزبست سرپانتین و (ب) آزبست آمفیبول شناسایی می‌شود. کریزوتیل کانی مهم گروه آزبست سرپانتین بوده که به آزبست سفید یا پنبه کوهی نیز معروف است.

کریزوتیل با ساختار فنری، خمیده و انعطاف‌پذیری بالا،

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۱۰۴۴۸۸۹، نمابر ۳۳۳۵۶۰۲۹-۰۴۱، پست الکترونیکی: hajialioghli@tabrizu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.14.6]

پایدارترین شکل کانی آزبست بوده و به‌علت این ویژگی به عنوان نوع پر خطر الیاف آزبستی نیز شناخته شده است. آزبست‌های آمفیبولی به‌صورت رشته‌های نازک، ظریف، کوتاه و یا بلند است. ترکیب شیمیایی آزبست‌های آمفیبولی پیچیده‌تر و متنوع‌تر از ترکیب شیمیایی آزبست سرپانتینی است. آزبست-های آمفیبولی به‌علت جایگزینی یک عنصر به وسیله‌ی عنصر دیگر از پایداری کمتری نسبت به آزبست‌های کریزوتیلی برخوردارند. آزبست‌های آمفیبولی متنوع بوده و انواع آن به دلیل سیستم تبلوری، عبارتند از [۲]: (۱) آزبست ارتوآمفیبول که در سیستم ارتورومبیک متبلور می‌شود. آنتوفیلیت با فرمول شیمیایی $(Mg, Fe)_7[Si_4O_{11}(OH)]_2$ از انواع آزبست ارتوآمفیبول است. (۲) آزبست کلینوآمفیبول که در سیستم تک میل متبلور شده و شامل کروسیدولیت (گونه آزبستی ریبکیت) $Na_2Fe_5[Si_4O_{11}(OH)]_2$، آموسیت (گونه آزبستی کومنگتونیت - گرونریت) $MgFe_6[Si_4O_{11}(OH)]_2$ و ترمولیت/اکتینولیت $Ca_2(Mg, Fe)_5[Si_4O_{11}(OH)]_2$ است. الیاف سوزنی و نوک تیز کروسیدولیت نوع خطرناک آزبست در ارتباط با بیماری با الیاف آزبستی است.

مجموعه افیولیتی تخت سلیمان در شمال شرق تکاب بقایایی از پوسته لیتوسفری اقیانوسی قدیمی بوده که طی کوهزایی پان-آفریقا بسته شده است [۳-۶]. سنگ‌های پریدوتیت در این مجموعه تحت تاثیر فرایندهای دگرسانی و دگرگونی به طور بخشی تا کامل سرپانتینی شده و منجر به تشکیل متاپریدوتیت‌های سرپانتینی شده و سرپانتینیت‌ها تشکیل شده‌اند. در این پژوهش کانی‌شناسی، ویژگی‌های بافتی، ریز ساختاری و فرایندهای تشکیل سرپانتینیت‌ها در مجموعه‌ی دگرگون تخت سلیمان بررسی شده و انواع آزبست با استفاده از بررسی‌های میکروسکوپی، بیناب‌سنجی رامان، پراش پرتو X و تجزیه‌ی ریزپردازشی مورد شناسایی قرار گرفته‌اند.

زمین‌شناسی منطقه

مجموعه‌ی دگرگون تخت سلیمان از نظر رده‌بندی‌های زمین-شناسی ساختاری توسط پژوهندگان مختلف در منطقه‌های ساختاری متفاوت البرز غربی-آذربایجان [۷]، سنندج-سیرجان [۸-۱۰] و ایران مرکزی [۱۱] در نظر گرفته شده است. این مجموعه دگرگون دارای تنوع بالایی از انواع سنگ‌ها از درجه‌ی دگرگونی پایین تا بالا شامل اسلیت، فیلیت، اکتینولیت شیست، دولومیت های ضخیم لایه با میان لایه‌های چرت، آمفیبولیت،

سن دقیق پی سنگ دگرگون و فازهای دگرشکل ثبت شده در دگرگونی‌های همبافت تخت سلیمان به روشنی مشخص نیست. سن منسوب به پرکامبرین –کامبرین دگرگون‌های منطقه در نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان [۱۲] و ۱/۱۰۰۰۰۰ ماه نشان [۱۳]، تنها بر اساس شدت دگرگونی و شواهد چینه‌شناسی، سنگ‌شناسی و فسیل‌شناسی ارائه شده است. بر اساس بررسی‌های [۱۴] سن نفوذ پروتولیت در گنیس‌های گرانیتی منطقه ماه نشان بر اساس روش U/Pb زیرکن، ۵۶۰ میلیون سال تعیین شده است. [۱۵] سن قدیم ترین سنگ‌ها در پوسته‌ی قاره‌ای دگرگون همبافت شمال شرق تکاب را به‌روش (SHRIMP II) U-Pb زیرکن موروثی در ملانوسوم میگماتیت‌های مافیک را ۲۷۷۵ تا ۲۷۹۵ میلیون سال تعیین کرده‌اند. سنگ‌های گرانیتوئیدی به سن ترشیاری در بخش‌های شمالی و مرکزی منطقه به داخل این مجموعه‌ی دگرگون نفوذ کرده است [۱۶].

مجموعه دگرگون پرکامبرین تخت سلیمان به شدت چین خورده و به وسیله‌ی گسل‌هایی روی سنگ‌های ترشیاری جوانتر رورانده شده‌اند (شکل ۱). رخداد دگرشکلی‌های شدید در این مجموعه به عملکرد فازهای زمین ساختی متعدد در منطقه، از پرکامبرین تا ترشیاری، نسبت داده شده است [۱۶]. روند برونزدهای سنگی مجموعه‌ی دگرگون پرکامبرین و نیز روند مجموعه سنگ‌های رسوبی و رسوبی-آتشفشانی جوانتر در راستای شمال غربی-جنوب شرقی، هم سو با روند غالب دگرشکلی‌های منطقه است. روند شیستوزیته، بریدگی، محور چین و گنیسوسیته انواع سنگ‌های دگرگون منطقه، سازگار با فاز فشارشی در جهت NE/SW پهنه‌ی عربستان و صفحه‌ی اوراسیایی است [۱۷]. وارون شدگی راستای شیب لایه‌بندی نیز که موازی بریدگی است، در برخی از اندازه‌گیری‌ها احتمالاً چین‌های بزرگ مقیاس در منطقه را نشان می‌دهد.

روندهای اندازه‌گیری شده متفاوت برای محور چین‌ها (NW-SE و NE-SW) احتمالاً چین‌خوردگی این سنگ‌ها در طی فازهای کوهزایی متعدد از کاتانگائی تا دوران سوم را نشان می-دهد. همچنین تغییرات در بعضی از اندازه‌گیری‌ها می‌تواند در ارتباط با تاثیر ریز چین‌ها و یا گسل‌های کوچک در منطقه باشد.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.14.6]



شکل ۱ نقشه‌ی زمین شناسی تخت سلیمان [۱۱].

بررسی‌های صحرایی سرپانتینیت‌ها

سنگ‌های پریدوتیت در مجموعه‌ی دگرگون تخت سلیمان به صورت میان لایه‌های نازک با آهک و یا به‌صورت بلوک‌های زمین ساختی در داخل دگرگون‌های متابازیک مشاهده می‌شوند (شکل ۱). این سنگ‌ها تحت تاثیر فرایندهای دگرسانی و دگرگونی، به‌طور بخشی تا کامل، سرپانتینی شده‌اند. سرپانتینیت ها با بیش از ۹۰ درصد حجمی سرپانتین در منطقه تشکیل شده‌اند. ترکیب پروتولیت سرپانتینیت‌ها احتمالاً هارزبورژیت و دونیت است. بافت غربالی الیوین و بقایای ارتوپیروکسن سرپانتینی شده در برخی از نمونه‌های دستی با چشم غیر مسلح قابل تشخیص است. رنگ سرپانتینیت‌ها در نمونه‌های دستی از قهوه‌ای تیره تا قهوه‌ای کم رنگ و سبز تیره تا سبز کم رنگ متغیر است. ساختار سرپانتینیت ها به‌طور چشمگیری از نوع توده‌ای و بریده هستند (شکل ۲ ب-ت). کانی‌های تیره به‌صورت شکل‌دار و در اندازه‌ی چند میلی متر با چشم غیر مسلح در نمونه‌های دستی سرپانتینیت‌ها قابل تشخیص‌اند. برخی از سرپانتینیت‌ها نیز برشی شده‌اند (شکل ۲ ت). کریزوتیل فیبری به‌صورت رگچه هایی به ضخامت چندین میلی متر در سرپانتینیت‌های برشی تشکیل شده است. برخی از سرپانتینیت‌های برشی دارای گرهک‌هایی از پورفیروکلاست‌های منیزیت هستند که به‌صورت برجسته در سطح نمونه‌ها با چشم غیر مسلح قابل تشخیص‌اند (شکل ۲ث).

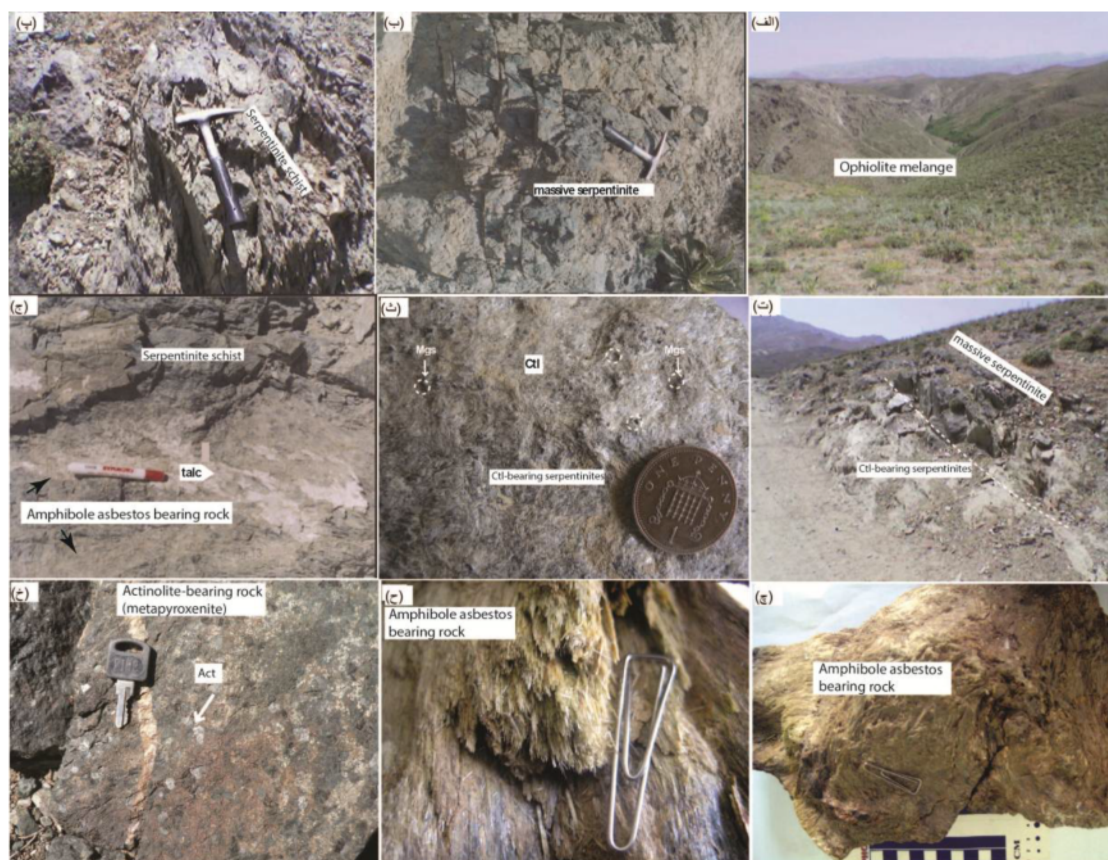
[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.14.6]

آزبست آمفیبول با رشته‌های ظریف و به رنگ زرد کم رنگ به صورت رگه‌های پر شده به ضخامت چندین متر در منطقه‌های برشی تشکیل شده است (شکل ۲ ج). الیاف نازک و سوزنی ترمولیت در نمونه‌های دستی آزبست آمفیبول مشابه با چوب کوهی و چوب پنبه مشاهده می‌شود (شکل ۲ چ-ح). رگه‌ی نازکی از تالک سفید نیز در داخل سرپانتینیت‌ها مشاهده می‌شود (شکل۲ ج). سنگ‌های کلینوپیروکسنیت دگرگون شده به صورت محدود در منطقه رخنمون دارد. کانی‌های کلینوپیروکسن درشت بلور در ارتباط با دگرگونی با درجه‌ی پایین تماماً به اکتینولیت تبدیل شده‌اند (سنگ‌های دارای اکتینولیت، شکل ۲ ح). اکتینولیت درشت بلور تا اندازه‌ی ۱ سانتی‌متر بیشتر از ۹۰ درصد حجمی سنگ‌های دارای اکتینولیت را تشکیل می‌دهد. آثار بافت دانه‌دار آذرین اولیه به خوبی در سنگ دیده می‌شود (شکل ۲ ح).

سنگ نگاری سنگ‌ها

در این بخش سنگ نگاری سرپانتینیت‌ها و سنگ‌های دگرگونی اطراف در مجموعه دگرگونی تخت سلیمان مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سرپانتینیت‌ها: سرپانتینیت‌های مورد بررسی بر اساس نوع سرپانتین، بافت و ویژگی‌های ریزساختاری شامل (الف) سرپانتینیت‌های توده‌ای (massive serpentinites)، (ب) سرپانتینیت‌های بریده بریده یا سرپانتینیت شیست‌ها (serpentinite schist/foliated serpentinite) و (ج) سرپانتینیت‌های دارای کریزوتیل (chrysotile bearing serpentinite) هستند.



شکل ۲ (الف) دورنمایی از برونزد مجموعه‌ی دگرگون‌های قدیمی تخت سلیمان، (ب) سرپانتینیت توده‌ای، (پ) سرپانتینیت شیست، (ت) سرپانتینیت کریزوتیل‌دار در راستای منطقه برشی محلی، (ث) گرهک‌های مگنزیت در سرپانتینیت کریزوتیل دار، (ج) سنگ دارای آزبست آمفیبول به رنگ زرد در داخل سرپانتینیت. تالک سفید در داخل سرپانتینیت نیز دیده می‌شود، (چ) نمونه‌ی دستی سنگ دارای آزبست آمفیبول، (ح) الیاف رشته‌ای و سوزنی آزبست آمفیبول، (خ) سنگ دارای اکتینولیت با درشت بلورهای اکتینولیت. بافت دانه‌دار و آذرین اولیه پروتولیت در سنگ به خوبی حفظ شده‌اند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.14.6]

سرپانتینیت‌های توده‌ای: این سنگ‌ها با بافت‌های سودومورف غربالی و بستایت پس از الیوین و پیروکسن دیده می‌شوند (شکل ۳ الف-ب). تنها الگوی شکستگی در کانی‌های الیوین و یا آثار رخ در پیروکسن ها قابل تشخیص است. لیزاردیت مرکز و کریزوتیل با حاشیه‌ی بافت غربالی را تشکیل داده است. گاه بقایایی بسیار ریز از کانی‌های الیوین در مرکز بافت غربالی برخی از نمونه‌ها قابل تشخیص‌اند (شکل ۳ ب). ارتوپیروکسن با کلیواژ خمیده در راستای رخ‌ها به وسیله سرپانتین و کانی-های تیره جایگزین شده است (شکل ۳ پ). کانی‌های تیره ریز دانه احتمالاً مگنتیت در حاشیه بافت غربالی طی سرپانتینی شدن تشکیل شده است (شکل ۳ ت). لیزاردیت در مقاطع نازک با بی رفرنژانس پایین قابل تشخیص از کریزوتیل فیبری با بدون شکستگی نسبتاً بالاست (شکل ۳ الف). اسپینل به رنگ سرخ قهوه‌ای به‌صورت نیمه شکل‌دار در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود.

سرپانتینیت‌های برش‌دار یا سرپانتینیت شیست ها: آنتی گوریت صفحه‌ای به‌طور اصلی بیشتر از ۹۰٪ تشکیل دهنده‌ی اصلی این سنگ‌ها است (شکل ۳ ث). بررسی‌های [۱۸-۲۰] نشان داده است که سنگ های غنی از آنتی گوریت معمولاً به-صورت شیست تشکیل می‌شوند. آنتی گوریت با سمت‌یابی ترجیحی موجب برش خوب در سرپانتینیت شیست‌های مورد بررسی شده است (شکل ۳ ث). اسپینل به‌صورت پورفیروکلاست و با ساختار دنباله دار (tail-like) با آنتی‌گوریت‌های دوباره تبلور یافته در پیرامون محصور شده است (شکل ۳ ث). در برخی از سرپانتینیت شیست‌ها به صورت سودومورف‌های سرپانتین (لیزاردیت+کریزوتیل) سمت یافته و عدسی مانند مشاهده می‌شوند (شکل ۳ ج). آنتی‌گوریت ریز دانه با بافت درون نفوذی (interpenetrative) در این نمونه، حاصل جانشینی بعدی آنتی گوریت‌های صفحه‌ای به وسیله‌ی انبوهی از ریز دانه‌های چندریختی با دمای پائین سرپانتین است (شکل ۳ ج). [۲۱] در بررسی‌هایش آنتی گوریت بسیار ریز دانه و بی-شکل در سرپانتینیت‌ها را گزارش کرده است. مگنتیت به‌صورت نوارهایی به موازات شیستوزیته در برخی از نمونه‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۳ چ). کلینوکلر و کانی‌های تیره در مقادیر فرعی در این سنگ‌ها حضور دارند.

سرپانتینیت‌های دارای کریزوتیل: این سنگ‌ها در منطقه‌های برشی محلی یافت می‌شوند. پورفیروکلاست کربناتی مگنزیت با کشیدگی از دو جهت در این سنگ‌ها به وسیله کریزوتیل در مقادیر فراوان در زمینه احاطه شده است (شکل ۳ ح). کریزوتیل فیبری نیز به‌صورت رگچه‌هایی به ضخامت چند میلی متر، شکستگی کانی‌ها و سنگ‌های سرپانتینیت را پر کرده است (شکل ۳خ).

سنگ‌های دارای آزبست آمفیبولی: این سنگ‌ها به صورت رگه مانند تا ضخامت چندین متر در منطقه‌های برشی ناحیه‌ای تشکیل شده‌اند. ترمولیت فیبری در اندازه چندین سانتی‌متر بیش از ۹۵٪ این سنگ‌ها را تشکیل داده است (شکل ۳ د).

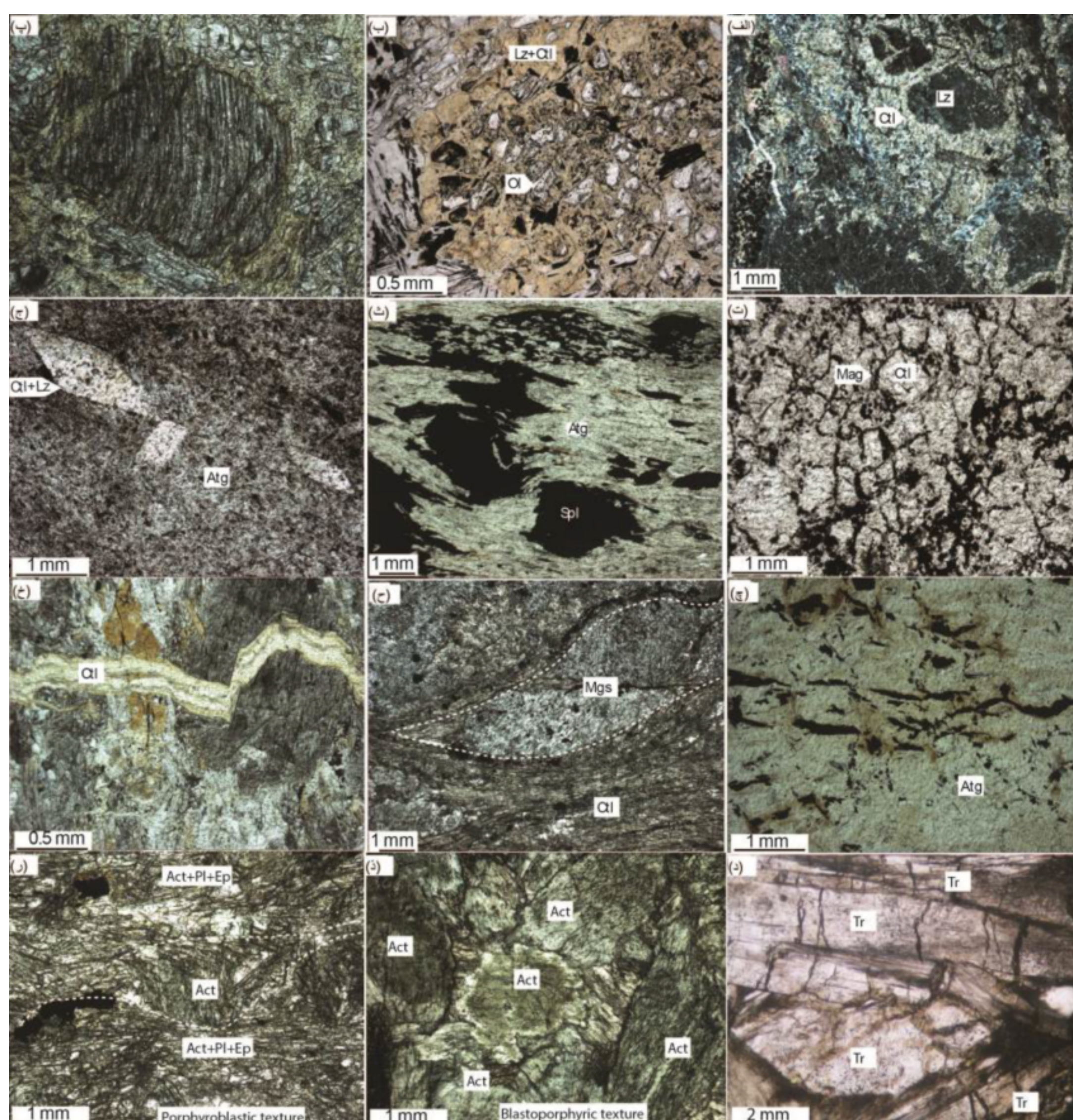
سنگ‌های دارای اکتینولیت (Actinolite-bearing rock): این سنگ‌ها بیشتر از ۹۰ درصد حجمی دارای اکتینولیت درشت دانه با منطقه‌بندی رنگی بوده و بافت پروتولیت آذرین دانه‌دار به‌خوبی در آن حفظ شده است (شکل ۳ ذ). اندازه‌ی کانی‌های اکتینولیت تا به ۱۰ میلی‌متر می‌رسد. کانی‌های تیره، مهم‌ترین کانی فرعی این سنگ‌ها هستند. سنگ‌های دارای اکتینولیت در ارتباط با دگرگونی با درجه‌ی پایین سنگ‌های کلینوپیروکسنیت در منطقه تشکیل شده‌اند.

سنگ‌های اکتینولیت شیست: سنگ‌های اکتینولیت شیست از دگرگونی سنگ‌های بازی در رخساره‌ی شیست سبز تشکیل شده‌اند. اکتینولیت با بافت پورفیروبلاستیک حدود ۸۰-۸۵ درصد حجمی سنگ را تشکیل داده و مجموعه کانی‌های دگرگونی پلاژیوکلاز±اپیدوت±کلسیت±کوارتز+کانی‌های تیره باقیمانده‌ی ترکیب سنگ را تشکیل می‌دهند (شکل ۳ ر). اکتینولیت های ریز دانه و کشیده با یک سمتگیری منظم، پورفیروبلاست اکتینولیت را دور زده‌اند (شکل ۳ ر). تفاوت اصلی اکتینولیت شیست‌ها با سنگ‌های دارای اکتینولیت در ترکیب کانی‌شناسی و بافتی آن‌هاست. سنگ‌های اکتینولیت شیست بر خلاف سنگ‌های دارای اکتینولیت که حاصل دگرگونی کلینوپیروکسنیت ها هستند در اثر دگرگونی سنگ-های بازی تشکیل شده و دارای مقادیر مودی کمی از کانی‌های ریز دانه پلاژیوکلاز، اپیدوت و کوارتز هستند.

روش‌های دستگاهی پژوهش

برای شناسایی آزبست کریزوتیل و آزبست آمفیبول در مجموعه‌ی دگرگون تخت سلیمان، از روش تجزیه‌ی XRD به وسیله دستگاه SIMENS (مدل D5005، و با ولتاژ ۴۰ KV، جریان ۴۰ MA و دمای ۲۷۰°C) در دانشگاه پتسدام آلمان استفاده شد.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.14.6]



شکل ۳ (الف) بافت غربالی سودومورف در سرپانتینیت توده‌ای. لیزاردیت در مرکز و کریزوتیل در حاشیه بافت غربالی مشخص است. حالت XPL، (ب) بافت غربالی با بقایای جزئی از الیوین در مرکز آن. حالت PPL، (پ) ارتوپیروکسن با رخ خمیده که به وسیله‌ی سرپانتین و کانی‌های تیره جایگزین شده است، حالت PPL، (ت) مگنتیت در حاشیه‌ی بافت غربالی در سرپانتینیت توده‌ای. حالت PPL، (ث) سرپانتینیت شیست. بلورهای تیغه‌ای آنتی گوریت و کانی‌های تیره به صورت بودین شده و کشیده در راستای برش شکل‌پذیر تشکیل شده است. حالت PPL، (ج) سودومورف سرپانتین از دو طرف کشیده شده با زمینه‌ی آنتی گوریت در سرپانتییت شیست. حالت PPL، (چ) کانی‌های تیره به صورت کشیده و خطی در سرپانتینیت شیست. حالت PPL، (ح) پورفیروکلاست مگنزیت و کریزوتیل ریز دانه در زمینه‌ی سنگ. حالت PPL، (خ) رگه‌ی کریزوتیل به‌صورت پر کننده شکستگی داخل سنگ. حالت XPL، (د) سنگ دارای آزبست آمفیبولی با سوزن‌هایی از ترمولیت به‌طول چندین میلی‌متر. حالت PPL، (ذ) سنگ دارای اکتینولیت. اکتینولیت با منطقه‌بندی رنگی و بافت آذرین اولیه در سنگ به خوبی حفظ شده است، حالت PPL، (ر) اکتینولیت شیست با پورفیروبلاست‌هایی از اکتینولیت که با اکتینولیت‌های کشیده و نسبتا ریز دانه تر در زمینه احاطه شده است. پلاژیوکلاز و اپیدوت نیز در زمینه ریز دانه مشاهده می‌شود. حالت PPL.

همچنین با استفاده از تجزیه‌ی XRD، شناسایی دقیق دیگر چندریختی‌های سرپانتینی (آنتی‌گوریت و لیزاردیت) در نمونه‌های سرپانتینیت انجام گرفت. زاویه‌ی پرتو X برخوردی به نمونه (2θ) ۷۰°-۴° است. روش تجزیه به‌صورت پودر و روش شمارش با استفاده از لوله‌های شمارنده انجام شده است. بیناب‌سنجی Raman نمونه‌هایی که چند ریخت‌های سرپانتین در آن‌ها قبلاً با بررسی‌های میکروسکوپی و تجزیه‌ی XRD تعیین شده بود در دانشگاه پتسدام آلمان (طیف سنجی آنتی گوریت و لیزاردیت) و کانازاوای ژاپن (طیف سنجی کریزوتیل) انجام گرفت.

بررسی نقطه‌ای آزبست در نمونه‌های مورد بررسی به منظور تعیین ترکیب شیمیایی کانی‌های تشکیل دهنده، با استفاده از ریزپردازنده‌ی الکترونی SX100 در مرکز بررسی‌های زمین‌شناسی پتسدام آلمان (GFZ) با ولتاژ ۱۵ kV و شدت جریان ۲۰-۱۰ nA انجام گرفت. داده‌های معرف تجزیه‌ی ریزپردازشی کانی‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. علایم اختصاری استفاده شده برای کانی‌ها از [۲۲] است.

بحث و بررسی

از بررسی شرایط تشکیل آزبست کریزوتیل و آزبست آمفیبول در مجموعه دگرگون‌های تخت سلیمان معلوم شد که در اصل کریزوتیل از دگرسانی و دگرگونی سنگ‌های اولترامافیک و مافیک غنی از منیزیم تشکیل شده است.

سنگ‌های پریدوتیت به ویژه هارزبورژیت و ورلیت با نسبت Mg/Si در حد ۱٫۵ در شرایط مناسب به کریزوتیل تبدیل می‌شوند. در پیروکسینیت نسبت Mg/Si کمتر از ۱٫۵ بوده و برای تشکیل کریزوتیل باید Si کاهش و یا Mg افزایش یابد. در دونیت نسبت Mg/Si در حدود ۲ بوده، بنابراین برای تشکیل کریزوتیل باید Si به سنگ اضافه شود و یا مقدار Mg کاهش یابد. سنگ‌های پریدوتیتی که دارای ۷۵٪ اولیوین و ۲۵٪ پیروکسن بوده و به‌میزان ۴۵٪ سرپانتینی شده باشند، دارای مناسب‌ترین ترکیب و شرایط برای تشکیل کریزوتیل هستند. سنگ‌های دونیتی علیرغم اینکه دارای الیوین بیشتری نسبت به سنگ‌های هارزبورژیتی هستند، ولی به علت خاصیت پلاستیسیته‌ای که دارند، در برابر فشارهای وارده جابجا شده و واکنش مناسب برای تشکیل درزه و شکاف از خود نشان نمی‌دهند. بدین جهت آزبست در سنگ‌های دونیتی ریز دانه کمتر از سنگ‌های هارزبورژیتی تشکیل می‌شوند. کریزوتیل به صورت رگچه‌هایی به ضخامت چندین میلی‌متر در سرپانتینیت های کریزوتیل‌دار تشکیل شده است. بر اساس آنچه گفته شد، احتمالاً می‌توان ضخامت کم رگچه‌های آزبست در متاپریدوتیت‌های تخت سلیمان را به مقادیر بالای الیوین در ترکیب پروتولیت این سنگ‌ها نسبت داد. به اعتقاد [۱۸]، مقادیر کم Cr_2O_3 در کریزوتیل نشان دهنده‌ی ترکیبهای غنی از الیوین پروتولیت الترامافیک است. داده‌های شیمی کریزوتیل‌های آنالیز شده (به بخش ۶-۳ مراجعه شود)، مقادیر کم کلینوپیروکسن و فراوانی الیوین در پروتولیت سرپانتینیت‌های مورد بررسی را تایید می‌کند.

جدول ۱ ترکیب شیمی آزبست در دگرگون‌های تخت سلیمان. Chr: آزبست کریزوتیل، Tr: آزبست ترمولیت.

Mineral	Chr-vein	Chr-vein	Chr-vein	Chr-matrix	Chr-matrix	Chr-matrix	Tr	Tr	Tr
SiO_2	۴۳٫۳۴	۴۰٫۸۲	۴۰٫۸۰	۳۹٫۷۶	۳۹٫۷۹	۴۰٫۵۴	۵۲٫۸۶	۵۳٫۹۱	۵۸٫۱۹
TiO_2	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۰۲
Al_2O_3	۱٫۶۱	۰٫۴۴	۰٫۸۷	۰٫۷۴	۰٫۱۰	۰٫۴۸	۵٫۳۰	۴٫۴۴	۲٫۴۹
FeO	۷٫۲۳	۸٫۱۷	۶٫۸۴	۷٫۰۹	۷٫۷۵	۸٫۷۸	۲٫۹۳	۲٫۷۸	۲٫۲۶
MnO	۰٫۲۸	۰٫۲۸	۰٫۱۳	۰٫۱۴	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۸
MgO	۳۳٫۷۲	۳۵٫۶۴	۳۸٫۴۷	۳۷٫۵۰	۳۶٫۹۱	۳۶٫۶۲	۲۲٫۳۲	۲۲٫۹۶	۲۳٫۷۳
CaO	۰٫۲۹	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۳	۱۲٫۴۸	۱۲٫۵۳	۱۲٫۴۷
Na_2O	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۱٫۳۹	۱٫۱۵	۰٫۶۷
K_2O	۰٫۰۹	۰٫۰۵	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۹	۰٫۰۶	۰٫۰۳
Cr_2O_3	۰٫۲۰	۰٫۰۴	۰٫۱۶	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۷۴	۰٫۶۵	۰٫۲۹
Sum	۸۶٫۸۲	۸۵٫۵۴	۸۷٫۳۴	۸۵٫۳۲	۸۴٫۷۸	۸۶٫۱۶	۹۸٫۲۲	۹۸٫۵۹	۹۸٫۲۲
O	۷	۷	۷	۷	۷	۷	۲۳	۲۳	۲۳
Si	۲٫۰۰	۱٫۹۹	۱٫۹۲	۱٫۹۲	۱٫۹۵	۱٫۹۵	۷٫۲۰	۷٫۲۸	۷٫۵۶
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰
Al	۰٫۱۸	۰٫۰۵	۰٫۱۰	۰٫۰۸	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۸۵	۰٫۷۱	۰٫۴۰
Fe	۰٫۲۹	۰٫۳۳	۰٫۲۷	۰٫۲۹	۰٫۳۲	۰٫۳۵	۰٫۳۳	۰٫۳۱	۰٫۲۵
Mn	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Mg	۲٫۳۴	۲٫۵۹	۲٫۶۹	۲٫۷۰	۲٫۷۰	۲٫۶۳	۴٫۵۳	۴٫۶۲	۴٫۷۶
Ca	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۱٫۸۲	۱٫۸۱	۱٫۸۰
Na	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۳۷	۰٫۳۰	۰٫۱۷
K	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Cr	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۰۳
Sum	۴٫۸۸	۴٫۹۹	۴٫۹۹	۵٫۰۰	۴٫۹۹	۴٫۹۸	۱۵٫۲۰	۱۵٫۱۲	۱۴٫۹۹

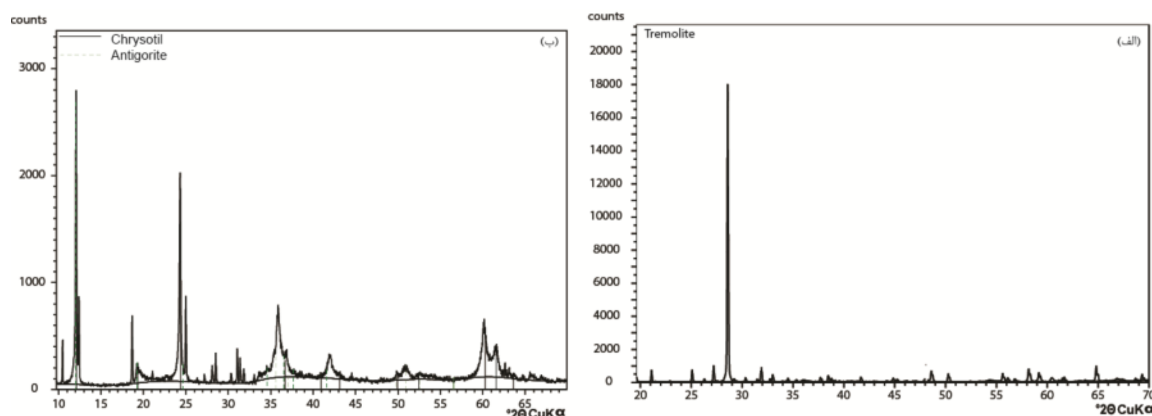
به‌طور کلی کریزوتیل در سرپانتینیت‌های تخت سلیمان به دو حالت تشکیل شده است: (الف) به همراه لیزاردیت و در مقادیر کم در سرپانتینیت‌های توده‌ای طی فرایندهای سرپانتینی شدن سنگ‌ها در شرایط ایستایی (ب) در سرپانتینیت‌های کریزوتیل دار طی فرایند سرپانتینی شدن سنگ‌ها در شرایط دینامیکی. تشکیل سرپانتینیت‌ها در این حالت همراه با دگرشکلی شکننده در آن‌ها بوده که موجب گسترش یک رشته درز و شکاف، پدیده سرپانتینی شدن دوباره فعال شده و الیاف کریزوتیل به شکل سوزن‌های خیلی ریز در زمینه و نیز رگچه‌هایی با ضخامت میلی‌متری داخل سرپانتینیت‌های کریزوتیل‌دار تشکیل شده است. جهت‌گیری الیاف کریزوتیل عمود بر راستای این رگچه هاست. رگچه‌های کریزوتیل در شکستگی‌های داخل سرپانتینیت‌ها حاصل تبلور ثانویه سرپانتین از آب‌های غنی شده بین شکاف‌ها و درزهای سرپانتینیت‌ها است.

آزبست آمفیبول الیافی به‌صورت رگه‌هایی تا ضخامت چندین متر در سنگ‌هایی با شکستگی‌های گسترش یافته تشکیل شده است. بنابراین به‌نظر می‌رسد که تشکیل آزبست آمفیبول در مجموعه‌ی دگرگونی‌های تخت سلیمان به فرایندهای دگرگونی و دگرشکلی‌های منطقه وابسته باشد. دگرسانی حاصل از گرمابی‌های وابسته به نفوذ توده‌های گرانیتوئیدی و عملکرد زمین ساختی (گسل، چین خوردگی و شکستگی) احتمالاً از دیگر عوامل تاثیر گذار در تشکیل رگه-های آزبست آمفیبول در شکستگی سنگ‌های منطقه است.

شناسایی کانی‌ها به روش پراش پرتو X (XRD) و بیناب سنجی رامان (Raman spectroscopy)

به منظور شناسایی آزبست و دیگر چندریختی‌های تشکیل دهنده‌ی سرپانتینیت‌ها، نمونه‌هایی از سنگ‌هایی که مقاطع نازک آن‌ها قبلاً به‌طور دقیق بررسی شده بود با استفاده از روش تجزیه‌ی XRD مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴ و ۵). داده-های اندازه‌گیری شده در سنگ‌های مورد بررسی به‌صورت الگوهای پراکنش با مقادیر مشخص d، Θ و I (intensity) نشان داده شده‌اند. تشخیص آزبست کریزوتیل، آمفیبول و چندریخت‌های لیزاردیت و آنتی‌گوریت در سرپانتینیت‌ها با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری: DIFFRAC^{Plus} Eva (Bruker Analytical X-ray system) و MACDIFF (4.2.5) (Petschik,R.2000)http://servermac.geologie.uni-frankfurt.de/Staff/Hompages/Petschick/RainerE.html) انجام گرفت. برنامه‌ی DIFFRAC^{Plus} Eva بر اساس مقادیر d و Θ، قله‌ی وابسته به چند ریخت‌های سرپانتین در نمونه‌های تجزیه شده را به‌صورت نمودارهای خطی مشخص می‌کند. شکل ۴ قله‌های شناسائی شده بر اساس مقادیر d و Θ وابسته به آزبست آمفیبول، کریزوتیل و آنتی گوریت در سرپانتینیت شیست را نشان می‌دهد. در نمونه‌ی آزبست آمفیبول، ترمولیت مقادیر قابل ملاحظه ای از سنگ را تشکیل داده است (شکل ۴ الف).

قله‌های شناسائی شده وابسته به چندریخت‌های سرپانتینی با استفاده از برنامه‌ی DIFFRAC ^{Plus} Eva با نتایج به‌دست آمده از برنامه MACDIFF کاملاً همخوانی نشان می‌دهد. در مواردی که قله‌ها همپوشی نشان می‌دهند تشخیص دقیق چندریخت‌های سرپانتینی مشکل است. برای تشخیص خطوط دقیق پراکنش چندریخت‌های سرپانتین که در مقادیر Θ همپوشی دارند از نرم افزار WIN-METRIC from Siemens Analytical X-ray system استفاده شد.



شکل ۴ قله‌های شناسائی شده بر اساس مقادیر d و Θ وابسته به (الف) ترمولیت در سنگ دارای آزبست آمفیبول، (ب) کریزوتیل و آنتی گوریت در سرپانتینیت‌های تخت سلیمان.

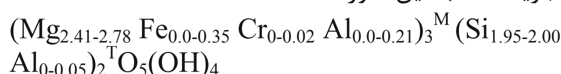
خطوط پراکنش نمایانند (representative) پارامترهـای unit cell محاسبه شده و مـشاهده شـده‌ی (observed) در نمـودار های ۲Θ نسبت به شدت جریان I، در شکل ۵ آورده شده است. این شکل خطوط پراکنش بـرای پارامترهـای سـلولی محاسـبه شده و مشاهده شده آنتـی گوریـت، لیزاردیـت و کریزوتیـل در نمونه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. خطوط پـراکنش بـرای کانی‌هـای بررسـی شـده بیـشتر بـا آنتـی گوریت و لیزاردیت همخـوانی داشـته و کریزوتیـل در مقـادیر کـم شناسایی شـد. مقداری آنتی‌گوریـت در ایـن سـنگ‌هـا جـایگزین لیزاردیت و کریزوتیل شده است (شکل ۵ الف). آنتی‌گوریت تقریباً بیشتر از ۹۰ درصد سرپانتینیت شـدن شیـست‌هـا را تـشکیل مـی‌دهـد (شکل ۵ ب). شـکل ۵ پ جـایگزینی آنتـی‌گوریت در مقـادیر بسیار جزئی به وسیله لیزاردیت و کریزوتیل را نـشان مـی‌دهـد. مقادیر کریزوتیل و لیزاردیت در نمونه‌های برشـی شـده بیـشتر است (شکل۵ ت).

این سازگار با مقادیر مودی مشاهده شـده در مقـاطع نـازک ایـن نمونـه‌هاسـت. بـرای اطمینـان در تـشخیص دقیـق انـواع چندریختی‌های سرپانتین، بینـاب‌هـای مربـوط بـه کریزوتیـل، لیزاردیت و آنتی گوریت به روش بیناب سنجی رامان تعیین شد (شکل ۶ و ۷).

کانی شیمی آزبست کریزوتیل و آزبست آمفیبول در مجموعه دگرگونی های تخت سلیمان

- **آزبست کریزوتیل:** کریزوتیل به صورت کـانی‌هـای ریـز دانـه تشکیل دهنده‌ی زمینه و نیز رگچه‌های پر کننده‌ی شکـستگی‌های سرپانتینیت مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱).

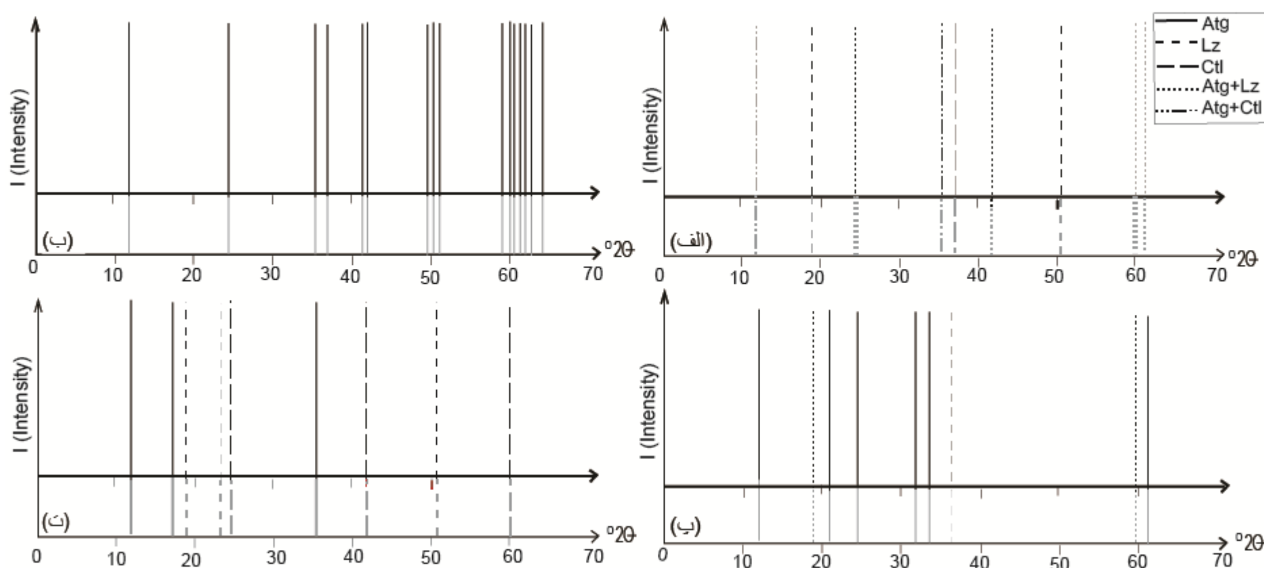
فرمول کانی شناسـی کریزوتیـل‌هـای تجزیـه شـده بـه ازای ۵ کاتیون و ۷ اکسیژن محاسبه شده است. سـاختار شـیمی کـانی های تجزیه شده به این صورت است:



$(Mg_{2.41-2.78}\ Fe_{0.0-0.35}\ Cr_{0-0.02}\ Al_{0.0-0.21})_3^{M}\ (Si_{1.95-2.00}\ Al_{0-0.05})_2^{T} O_5(OH)_4$

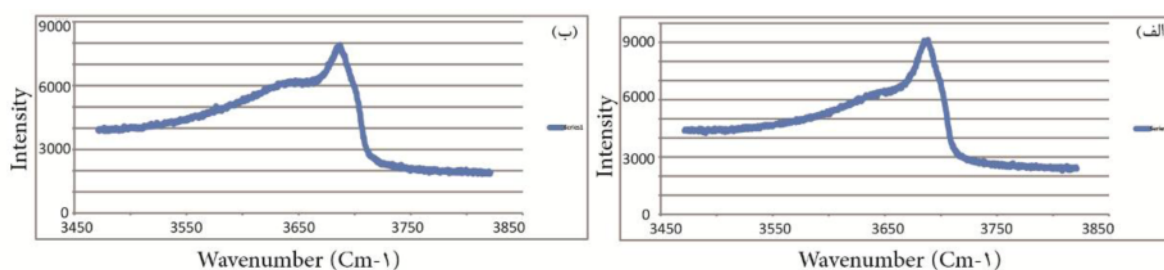
کریزوتیل دارای مقادیر بالای (۳۳/۷۲-۳۸/۴۷ wt%) MgO و (۳۹/۷۶-۴۳/۳۴ wt%.) SiO_2 بـوده و مقـادیر Al_2O_3 در آن بـسیار پائین و قابل چـشم‌پوشـی اسـت (۰/۱۰-۱/۶۰ wt%). Cr_2O_3 در کریزوتیل در مقادیر جزئی است. این ویژگی احتمالاً به کلینوپیروکسن کـم و الیـوین فـراوان در ترکیـب پروتولیـت اولترامافیک آن وابسته است. [۲۳] مقادیر کـم Cr_2O_3 در شـبه ریخت‌های سرپانتین را به ترکیبات سرشار از الیـوین پروتولیـت نسبت داده‌اند.

- **آزبست آمفیبول:** آزبست آمفیبول به‌صورت پر کننده رگه تـا ضخامت چند متر در منطقه‌های برشی ناحیه‌ای تـشکیل شـده است. داده‌های شیمی کـانی‌هـای معـرف آزبـست آمفیبـول در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

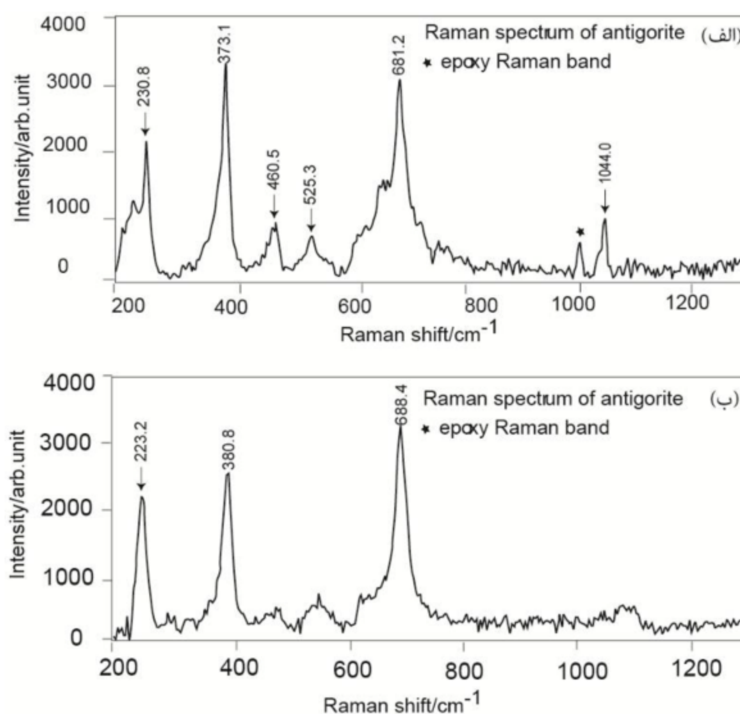


شکل ۵ خطوط پراکنش پارامترهای سلولی محاسبه شده و مشاهده شده آنتی گوریت، لیزاردیت و کریزوتیل در (الف) سرپانتینیت توده‌ای، (ب) سرپانتینیت شیست، (پ) سرپانتینیت شیست با بافت نفوذی که در آن آنتی گوریت به‌صورت جزئی به‌وسیله‌ی لیزاردیت و کریزوتیل جانشین شده است، (ت) سرپانتینیت دارای کریزوتیل. خط افقی در نمودار، خطوط پراکنش محاسبه شده را (پایینی) از خطوط پراکنش مشاهده شده (بالایی) جدا می‌کند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.14.6]



شکل ۶ (الف و ب) بیناب‌سنجی رامان کریزوتیل در سرپانتینیت‌های کریزوتیل‌دار تخت سلیمان.



شکل ۷ بیناب‌سنجی رامان انواع سرپانتین در سرپانتینیت شیست‌های تخت سلیمان (الف) آنتی گوریت و (ب) لیزاردیت.

فرمول آمفیبول بر اساس ۱۶ کاتیون و ۲۳ اتم اکسیژن محاسبه شده است. تغییرات ترکیبی در کانی‌های آمفیبول تجزیه شده کم است. ترکیب آمفیبول بر اساس نمودار $Mg/Mg+Fe^{2+}$ نسبت به Si [۲۳] در گستره‌ی ترمولیت قرار می‌گیرند.

دگرشکلی سرپانتینیت‌ها در مجموعه‌ی دگرگونی تخت سلیمان

سرپانتینیت‌های توده‌ای با بافت های سودومورفی غربالی و بستایت طی سرپانتینی شدن درجا یا استاتیک، پریدوتیت‌های اولیه تشکیل شده‌اند. رخدادهای بعدی طی انتقال توده‌های سرپانتینیتی به سطح زمین باعث ثبت آثار دگرشکلی در آن‌ها شده است. بر اساس شواهد کانی‌شناسی، ویژگی‌های بافتی و ریزساختاری سرپانتینیت‌های مورد بررسی می‌توان دگرشکلی آن‌ها را در دو حالت شکل‌پذیر و شکننده در نظر گرفت:

دگرشکلی شکل‌پذیر (Ductile): این نوع دگرشکلی در سرپانتینیت شیست‌های منطقه‌های برشی ناحیه‌ای مشاهده می‌شود. برخی از شواهد کانی‌شناسی و بافتی دال بر رخداد دگرشکلی شکل‌پذیر در این سنگ‌ها عبارتند از: (a) سمتگیری موازی کانی‌های آنتی گوریت صفحه‌ای شکل به‌طول ۱/۲ میلی-متر که به‌طور اصلی بیشتر از ۹۰٪ این سنگ‌ها را تشکیل داده و باعث بریدگی در آن‌ها شده است. (b) کانی‌های تیره به طول ۱/۵ میلی متر که به شکل بودین تشکیل شده‌اند (شکل ۳ ث). (c) کانی‌های به‌صورت کشیده و صفحه‌ای به موازات بریدگی در سرپانتینیت تشکیل شده است (شکل ۳ چ). (d) شبه ریخت

سرپانتین با کشیدگی از دو سمت در سرپانتینیت‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۳ ج).

دگرشکلی شکننده (Britle): این نوع دگرشکلی در سرپانتینیت‌های کریزوتیل‌دار منطقه‌های برشی محلی مشاهده می‌شود. (a) این سنگها دارای پورفیروکلاست‌های درشت دانه مگنزیت در اندازه‌ی ۷ میلی‌متر در زمینه ریز دانه متشکل از کریزوتیل، لیزاردیت و مگنزیت/دولومیت هستند (شکل ۳ ح). (b) کریزوتیل فیبری به‌صورت ثانویه و رگچه‌ای شکستگی های داخل پورفیروکلاست‌ها و زمینه‌ی ریز دانه‌ی سنگ را پر کرده است (شکل ۳ خ). (c) انباشت‌های ریز دانه فراوانی از کریزوتیل و لیزاردیت در زمینه‌ی جانشین آنتی‌گوریت شده است.

شکل‌گیری‌های سرپانتینیت‌ها در مجموعه‌ی دگرگون تخت سلیمان

تغییرات مجموعه کانی‌ها و بافت سرپانتینیت‌ها در طول انتقال و پس از آن بازتاب‌دهنده‌ی شرایط دگرشکلی و تغییرات دما و فشار در آن‌ها است. بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، کانی شناسی، بافتی و دگرشکلی در سرپانتینیت‌های تخت سلیمان، شکل‌گیری‌های سرپانتینیت‌ها از آغاز تشکیل تا جایگیری در سطح زمین، در سه مرحله پیشنهاد شده است:

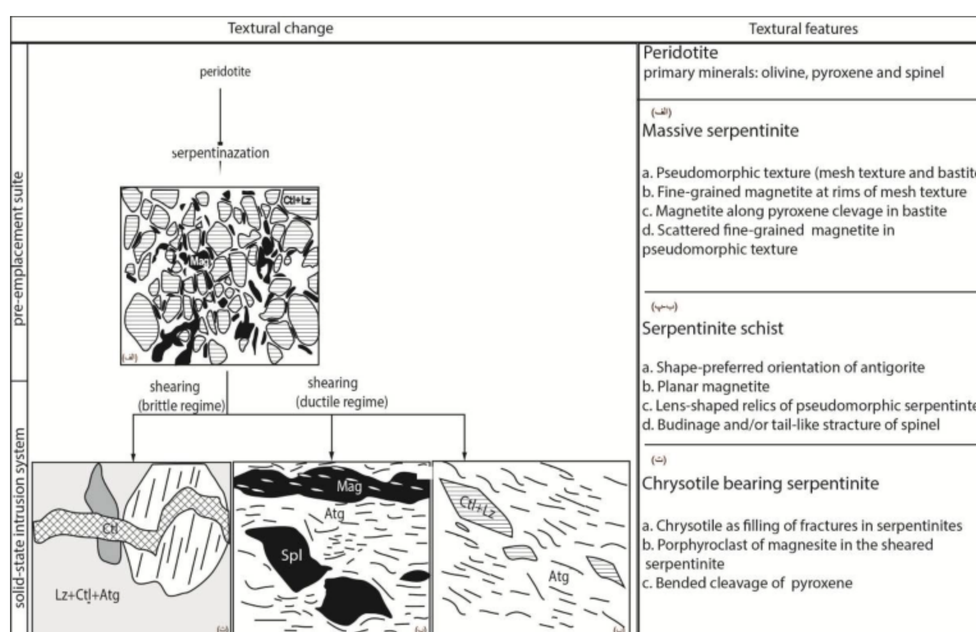
۱- مرحله‌ی ایستایی و تشکیل سرپانتینیت‌های توده‌ای؛ در مرحله‌ی اول الیوین و پیروکسن به لیزاردیت و/یا کریزوتیل با بافت شبه ریخت تبدیل شده‌اند (شکل ۸ الف). چند ریخت‌های لیزاردیت و کریزوتیل با دما پایین بوده و به طور مستقیم از دگرسانی الیوین در دماهای پایین تر از ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد [۲۴] و یا ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد [۲۵] تشکیل می‌شوند. تشکیل سرپانتینیت‌های توده‌ای را می‌توان آغاز مرحله سرپانتینی شدن درجا (بدون زمین‌ساختی) در نظر گرفت.

۲- مرحله‌ی دگرشکلی شکل پذیر در راستای منطقه‌های برشی ناحیه‌ای و تشکیل سرپانتینیت شیست‌ها: در مرحله‌ی دوم آنتی گوریت جایگزین لیزاردیت و/یا کریزوتیل شده و سرپانتینیت شیست‌ها با سمت‌گیری موازی آنتی‌گوریت تشکیل شده است (شکل ۸ ب). آنتی گوریت چندریخت با دما بالای سرپانتین بوده و در دماهای بالاتر تقریباً ۲۵۰ تا ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پایدار است [۲۵]. بر اساس پایداری آنتی‌گوریت و نوع دگرشکلی، سرپانتینیت شیست‌های مورد بررسی، دگرشکلی شکل‌پذیر در شرایط نسبتاً بالای فشار و دما [۲۶] را متحمل شده‌اند. طی این مرحله سرپانتینیت‌های توده‌ای پس از تشکیل در حالت جامد در راستای منطقه‌های برشی ناحیه ای از پوسته‌ی تحتانی و گوشته‌ی فوقانی در شرایط دگرشکلی شکل-پذیر به سطح زمین انتقال یافته و سرپانتینیت شیست‌ها در این فاصله ارتباط تشکیل شده‌اند.

۳- مرحله‌ی دگرشکلی شکننده در راستا منطقه‌های برشی محلی و تشکیل سرپانتینیت‌های کریزوتیل دار: در ادامه‌ی جایگیری، سرپانتینیت‌های کریزوتیل‌دار در شرایط دگرشکلی شکننده در شرایط عمق کم و دمای پایین تشکیل شده و بافت کاتاکلاستیک و تشکیل کریزوتیل رگه‌ای از سرشتی‌های آن است. در این مرحله سرپانتنیت شیست‌ها به‌طور بخشی به-وسیله‌ی کریزوتیل جایگزین شده‌اند. البته شواهد بافتی در برخی از نمونه‌ها نشان می‌دهد که برخی از سرپانتینیت‌های توده‌ای به‌طور مستقیم به وسیله‌ی کریزوتیل جایگزین شده‌اند بدون اینکه قبلاً تحت تاثیر جایگزینی فاز آنتی گوریت قرار گرفته باشند (شکل ۸ ت). البته بقایای بافت شبه ریخت در این سنگ‌ها نشان می‌دهد که فرایندهای جانشینی به‌وسیله‌ی کریزوتیل ناقص بوده است (شکل ۸ ت).

بنابراین بر اساس بررسی‌های سنگ نگاری، کانی‌شناسی و بافتی در سرپانتینیت‌های تخت سلیمان، به‌نظر می رسد جایگیری سرپانتینیت‌ها از شرایط شکل‌پذیر به شکننده تغییر یافته که در این راستا سرپانتینیت‌های توده‌ای به ترتیب به سرپانتینیت شیستی‌ها و سرپانتینیت‌های کریزوتیل دار تغییر کنند. بر این اساس این سرپانتینیت‌ها پس از تشکیل در حالت جامد از پوسته‌ی تحتانی و گوشته‌ی فوقانی، به سطح زمین انتقال یافته اند. با در نظر گرفتن اینکه فولیاسیون در سرپانتینیت شیست ها در راستای موازی با راستای طویل شده توده های بزرگ سرپانتینیتی است، به نظر می رسد که چگونگی دگرشکلی میکروسکوپی در سرپانتینیت شیست‌ها مشابه فرایندهایی است که توزیع و تشکیل آن‌ها را در مقیاس بزرگتر در طول منطقه‌های گسلی با روند غالب NW-SE کنترل کرده است. نمونه برداری سرپانتینیت شیست‌ها در راستای منطقه‌های برشی این ادعا را تایید می‌کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود که جایگیری سرپانتینیت های توده ای از قبل تشکیل شده (pre-existing)، به حالت-جامد همزمان با زمین‌ساختی و وابسته به فرایندهای دگرشکلی شکل‌پذیر و شکننده بترتیب در طول منطقه‌های گسلی ناحیه‌ای و محلی رخ داده است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.14.6]



شکل ۸ (الف-ت) مدل شماتیکی که تغییرات بافتی سرپانتینیت‌های تخت سلیمان در سیستم نفوذی حالت-جامد (solid-state intrusion system) را نشان می‌دهد.

برداشت

- سرپانتینیت‌های تخت سلیمان بر اساس نوع سرپانتین چندریختی، ویژگی‌های بافتی و ریزساختاری در سه گروه دسته بندی شده‌اند که عبارتند از: سرپانتینیت‌های توده‌ای، سرپانتینیت‌های فولیاسیون‌دار یا سرپانتینیت شیست‌ها و سرپانتینیت‌های دارای کریزوتیل.

- بر پایه‌ی بررسیهای سنگ نگاری، کانی‌شناسی و بافتی در سرپانتینیت‌های تخت سلیمان، به نظر می‌رسد که جایگیری سرپانتینیت‌ها از شرایط شکل‌پذیر به شکننده تغییر یافت که در این راستا سرپانتینیت‌های توده ای به ترتیب به سرپانتینیت شیست‌ها و سرپانتینیت‌های کریزوتیل دار شکل گرفته‌اند.

- بر اساس شواهد سنگ نگاری، داده های بیناب سنجی رامان، کانی شناسی XRD و بررسی ریزپردازشی، آزبست در مجموعه‌ی دگرگونی های تخت سلیمان از هر دو نوع آزبست کریزوتیل و آزبست آمفیبول است.

- آزبست کریزوتیل به‌صورت رگچه‌های پر شده با ضخامت میلی‌متری در سنگ‌های سرپانتینیت کریزوتیل‌دار در منطقه های برشی محلی تشکیل شده است. ضخامت نازک رگچه‌های آزبست کریزوتیل را می‌توان به مقادیر بالای الیوین در ترکیب پروتولیت این سنگ‌ها نسبت داد. مقادیر کم Cr_2O_3 در ترکیب شیمی کریزوتیل‌های آنالیز شده، مقادیر کم کلینوپیروکسن و فراوانی الیوین در پروتولیت سرپانتینیت‌های مورد بررسی را تایید می‌کند.

- آزبست آمفیبول با الیاف ظریف، بلند و قابلیت انعطاف خوب به صورت رگه تا ضخامت چندین متر در سنگ‌هایی با شکستگی‌های گسترش یافته در منطقه‌های برشی ناحیه‌ای تشکیل شده است.

قدردانی

از Dr. M. Wilke از دانشگاه پتسدام به خاطر کمک در استفاده از نرم افزار WIN-METRIC و M. Borchert از دانشگاه پتسدام به خاطر تجزیه XRD نمونه‌ها و O. Appelt and D. Rhede از GFZ برلین برای تجزیه میکروپروب نمونه‌ها تشکر و قدردانی می شود. از داوران محترم مجله بلور شناسی و کانی‌شناسی ایران که با ارائه پیشنهادات سازنده به ارتقاء کیفی مقاله مساعدت نمودند صمیمانه سپاسگزاریم.

مراجع

[1] Chatterjee K. K., *"Uses of Industrial Minerals, Rocks and Freshwater"*, Nova Science Publishers (2009) 584 p.

[2] Devore G. W., *"Preferred mineral distributions of polymineralic rocks related to non-hydrostatic stresses as expressions of mechanical equilibria"*, Journal of Geology 77 (1968) 26-38.

[14] Stockli, D.F., Hassanzadeh, J., Stockli, L.D., Axen, G., Walker, J.D. and Dewane, T.J., *"Structural and geochronological evidence for Oligo-Miocene intra-arc low-angle detachment faulting in the Takab-Zanjan area, NW Iran"* Abstract, Programs Geological Society of America, 36 (2004) 319.

[15] Moazzen, M., Hajialioghli, R., Moller, A., Droop, G., Oberhansli, R., Altenberger, U., Jahangiri, A., *"Oligocene partial melting in the Takab metamorphic complex, NW Iran: Evidence from in situ U-Pb geochronology"* Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran, 24 (3) (2013) 217-228.

[16] Hajialioghli R., Moazzen M., Jahangiri A., Oberhänsli R., Mocek B. and Altenberger U., *"Petrogenesis and tectonic evolution of metaluminous sub-alkaline granitoids from the Takab Complex, NW Iran"*, Geological Magazine 148 (2010 b) 250-268.

[۱۷] حاجی علی اوغلی ر.، *"بررسی پترولوژی سنگ‌های دگرگونی کالک-سیلیکات و متابازیک مجموعه تخت سلیمان در شمالشرق تکاب (غرب ایران)"* رساله دکتری، (۱۳۸۶) دانشگاه تبریز.

[18] Li X.P., Rahn M., Bucher K., *"Metamorphic processes in rodingites of the Zermatt-Saas Ophiolites"* International Geological Review 46 (2004) 28-51.

[19] Hermann J., Muntener O., Scambelluri M., *"The importance of serpentinite mylonites for subduction and exhumation of oceanic crust"*, Tectonophysics 327 (2000) 225–238.

[20] Wicks F. J., *"Deformation histories as recorded by serpentinites, II: Deformation during and after serpentinization"*, Canadian Mineralogist 22 (1984) 197–204.

[21] Maltman A. J., *"Serpentinite textures in Anglesey, North Wales, United Kingdom"*, Geological Society of American Bulltin 89 (1978) 972–980.

[22] Kretz R., *"Symbols for rock-forming minerals"* American Mineralogist 68 (1983) 277-279.

[23] Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne F. C., Kato A., Kisch H. J., Krivovichev V. G., Linthout K., Laird J., Mandarino J. A., Maresh V. W., Nickel E. H., Rock N. M. S., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W. and Youzhi G., *"Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on*

[3] Hajialioghli R., Moazzen M., Jahangiri A., Droop G. T. R. Bousquet R. and Oberhänsli R., *"Petrogenesis of meta-peridotites in the Takab area, NW Iran",* Goldschmidt Conference Abstracts, Cologne, Germany (2007 a) A370.

[4] Hajialioghli R., Moazzen M., Droop G. T. R., Oberhansli R., Bousquet R. Jahangiri A. and Ziemann M., *"Serpentine polymorphs and P-T evolution of meta-peridotites and serpentinites in the Takab area, NW Iran"*, Mineralogical Magazine 71 (2007 b) 155–174.

[5] Moazzen M. Hajialioghli R. *"Zircon SHRIMP dating of mafic migmatites from NW Iran; Reporting the oldest rocks from the Iranian crust",* 5th Annual Meeting AOGS, Busan, Korea. (2008) SE62.

[6] Hajialioghli R., Moazzen M., Droop G., Oberhansli R., Bousquet R., Jahangiri A., *"Tectonic implications of the oligocene mafic migmatites in the Takab core complex, NW Iran"*, Tectonic Crossroads: Evolving Orogens of Eurasia-Africa-Arabia Ankara, Turkey (2010 a).

[6] Virta R. L., *"Asbestos"*, U.S. Geological Survey Minerals (2000) 7 p.

[۷] افتخارنژاد، ج.، *"طبقه بندی تکتونیکی ایران در ارتباط با حوضه های رسوبگذاری"*، مجله انجمن نفت ایران، ۸۲ (۱۳۵۹) ۱۹-۲۸.

[8] Stocklin, J., *"Structural history and tectonics of Iran: a review: American Association of Petroleum",* Geologists Bulletin, 52 (1968) 1229–1258.

[9] Alavi, M., *"Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations"*, Tectonophysics, 229 (1994) 211–238.

[10] Alavi, M., *"Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust belt of Iran and its proforelenad Evolution"* American Journal of Science, 304 (2004) 1–20.

[11] Berberian, M. and King, G.C.P., *Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran"* Canadian Journal of Earth Sciences, 18 (1981) 210–265.

[۱۲] بابا خانی ع. و قلمقاش ج. *"نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان"*، (۱۳۷۱) سازمان زمین شناسی ایران.

[۱۳] لطفی، م.، *"نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ ماه نشان"* سازمان زمین شناسی ایران، (۱۳۸۰) تهران.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.14.6]

[25] Evans B., *"The serpentine multisystem revisited: Chrysotile is metastable"*, International Geology Review 46 (2004) 479-506.

[26] Hirauchi K., *"Serpentinite textural evolution related to tectonically controlled solid-state intrusion along the Kurosegawa Belt, northwestern Kanto Mountains, central Japan"*, Island Arc 15 (2006) 156–164.

amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names", American Mineralogist 82 (1997) 1019–1037.

[24] O'Hanley D. S., Wicks F. J., *"Conditions of formation of lizardite, chrysotile and antigorite, Cassiar, British Columbia"*, Canadian Mineralogist 33 (1995) 753–73.